

УДК 681.11.031.11

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

**ОПТИМИЗАЦИЯ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛООВОГО  
НАКОПИТЕЛЯ ТИПА «М» ДЛЯ  
АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

Зинуров Вадим Эдуардович  
Канд. техн. наук  
SPIN – код автора: 1564-3438  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Гумерова Гузель Хайдаровна  
Канд. техн. Наук, доцент  
SPIN – код автора: 5237-5977  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

Чернова Олеся Станиславовна  
Студент  
*Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия*

В статье рассматривается вопрос использования высокотемпературного теплового накопителя энергии в агропромышленном комплексе, где эффективное теплоснабжение является важным фактором повышения производительности. Актуальность темы обусловлена необходимостью минимизировать операционные затраты и снизить влияние внешних энергетических ограничений, особенно в отдалённых регионах с нестабильным снабжением топливом. В работе предпринята попытка комплексного исследования конструктивных и экономических параметров накопителя типа «М», разработанного на основе графитовой засыпки. Основной упор сделан на выявление наиболее рационального сочетания рабочей температуры, толщины теплоизоляции и итоговой стоимости системы. Для проведения анализа использовался усовершенствованный алгоритм расчёта теплопередачи в цилиндрической геометрии, включающий учёт теплопроводности твёрдых материалов, лучистого теплообмена и эквивалентной теплопроводности в газонаполненных зазорах. Алгоритм дополнен блоком, оценивающим совокупные затраты на сырьё и материалы – графит, вольфрам, базальтовую вату и аргон – на основе рыночных цен. Полученные результаты показывают, что температура графитового наполнителя и величина теплопотерь через изоляцию оказывают определяющее влияние на суммарную стоимость установки. Высокая температура обеспечивает лучшую энергоёмкость, однако требует усиленной защиты от рассеивания тепла и, соответственно,

UDC 681.11.031.11

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

**OPTIMIZATION OF A HIGH-TEMPERATURE  
THERMAL STORAGE SYSTEM OF TYPE «M»  
FOR THE AGRICULTURAL INDUSTRY**

Zinurov Vadim Eduardovich  
Cand.Tech.Sci.  
RSCI SPIN-code: 1564-3438  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Gumerova Guzel Khaydarovna  
Cand.Tech.Sci., Associate Professor  
RSCI SPIN-code: 5237-5977  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

Chernova Olesia Stanislavovna  
Student  
*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia*

The article explores the application of a high-temperature thermal energy storage system in the agricultural industry, where efficient heat supply is a key factor in enhancing productivity. The relevance of this topic is driven by the need to minimize operational costs and reduce the impact of external energy constraints, particularly in remote regions with unstable fuel supply. This study presents a comprehensive investigation of the structural and economic parameters of a type "M" thermal storage system based on graphite filling. The primary focus is on identifying the most rational combination of operating temperature, insulation thickness, and overall system cost. For the analysis, an improved heat transfer calculation algorithm in cylindrical geometry was utilized, incorporating the thermal conductivity of solid materials, radiative heat exchange, and the equivalent thermal conductivity of gas-filled interlayer gaps. The algorithm was further enhanced with a cost assessment module that evaluates the total expenditure on raw materials—graphite, tungsten, basalt wool, and argon—based on market prices. The obtained results indicate that the temperature of the graphite filler and the level of heat loss through insulation have a decisive impact on the total system cost. Higher temperatures provide better energy storage capacity but require enhanced thermal protection, thereby increasing insulation expenses

повышает затраты на изоляцию

Ключевые слова: АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ТЕПЛОВОЙ НАКОПИТЕЛЬ, ГРАФИТ, ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ХРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ, ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ, ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Keywords: AGRICULTURAL INDUSTRY, THERMAL STORAGE SYSTEM, GRAPHITE, HIGH-TEMPERATURE ENERGY STORAGE, THERMAL INSULATION, ECONOMIC EFFICIENCY

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-207-040>

**Введение.** Энергетическое обеспечение агропромышленного комплекса (АПК) играет ключевую роль в поддержании стабильного роста сельскохозяйственного производства. Широкий спектр технологических операций в животноводстве, растениеводстве и переработке требует значительных затрат тепловой энергии, необходимой для отопления, сушки, кондиционирования и поддержания микроклимата. Однако традиционные способы получения тепла зачастую связаны с существенными финансовыми издержками и экологическими рисками, что стимулирует поиск более эффективных подходов. Одним из перспективных направлений в сфере энергоресурсного обеспечения АПК считается хранение тепла при высоких температурах с использованием инновационных тепловых накопителей энергии.

Подобные системы позволяют аккумулировать избыточную тепловую энергию, возникающую в периоды относительно низкого спроса или при наличии резервных источников нагрева, а затем использовать её в более подходящее время. Это даёт возможность сгладить нагрузку на энергосистемы, сократить расходы на топливо и снизить выбросы вредных веществ. Кроме того, наличие автономного запаса тепла помогает оптимизировать производственные циклы, обеспечивая бесперебойное функционирование тепловых процессов даже при перебоях в поставках топлива или энергии.

Внедрение современных решений по накоплению тепловой энергии особенно актуально для объектов АПК, работающих в удалённых или труднодоступных регионах, где подключение к централизованным

<http://ej.kubagro.ru/2025/03/pdf/40.pdf>

ресурсам осложнено или нецелесообразно с экономической точки зрения. В таких условиях тепловые накопители выступают гарантом устойчивой работы, позволяя уменьшить зависимость от внешних энергетических поставщиков и повышая автономность сельскохозяйственного предприятия.

Рост интереса к высокотемпературным аккумулирующим системам в АПК объясняется и стремлением обеспечить экологическую безопасность. Применение накопителей тепла потенциально даёт заметный эффект в деле снижения углеродного следа, поскольку позволяет аккумулировать излишки энергии из возобновляемых источников (например, солнечной) и рационально использовать их для поддержания температурных процессов на предприятиях агропромышленного сектора. Тем самым достигается более высокая энергетическая эффективность, что способствует дальнейшему развитию «зелёного» сельского хозяйства и повышению конкурентоспособности продукции, соответствующей актуальным тенденциям ответственного природопользования.

**Состояние исследований и актуальность проблемы.** Способность аккумулировать и впоследствии высвободить тепловую энергию давно привлекает внимание исследователей и инженеров, ориентированных на повышение энергоэффективности производственных процессов. Вопросы, связанные с выбором оптимального конструктивного материала для накопителей и методами расчёта динамики теплопередачи, активно обсуждаются в научной среде. Традиционно наибольшее распространение имеют низко- и среднетемпературные системы хранения, однако в последнее десятилетие всё большую популярность приобретают высокотемпературные решения, позволяющие достичь более компактных размеров и повысить удельную ёмкость запасаемой энергии.

В агропромышленном комплексе к подобным установкам предъявляются особые требования, обусловленные разнообразием

производственных циклов. В условиях регулярной потребности в тепле — для сушки зерна, поддержания микроклимата в теплицах и переработки сельхозпродукции — важно обеспечить надежность и повторяемость циклов накопления и отдачи энергии. При этом ресурс накопителя должен быть достаточно большим, чтобы покрывать как кратковременные потребности, так и относительно долгосрочные циклы, например, в период межсезонья.

Современные исследования в данной области уделяют повышенное внимание вопросам термической стабильности накопительных материалов, а также эффективности теплоизоляции, позволяющей снизить паразитные потери. Отдельным направлением стала оптимизация экономических параметров, включающая анализ затрат на сырьё, производство и обслуживание. Именно комплексный подход — сочетание теплотехнических и технико-экономических расчётов — обеспечивает наиболее полное понимание перспектив применения высокотемпературных тепловых накопителей в АПК.

Многочисленные научные публикации демонстрируют возможности развития подобных систем за счёт новых композиционных материалов и инновационных изоляционных покрытий, снижающих уровень теплопотерь. Одновременно ведутся работы по совершенствованию алгоритмов расчёта, призванных учесть не только физические процессы теплопереноса, но и экономические факторы. Так, в работе [1] была представлена оригинальная конструкция накопителя на основе графитового заполнителя, а также разработан алгоритм определения ключевых параметров устройства, что позволило повысить точность моделирования тепловых процессов и приблизить результаты к практическому применению.

**Цель исследований.** Целью данного исследования является подробная технико-экономическая оценка высокотемпературного

теплового накопителя типа «М», ориентированная на выявление наилучшего соотношения между объёмом графитовой засыпки, уровнем рабочей температуры, толщиной изоляционного слоя и совокупной стоимостью оборудования при заданном запасе тепловой энергии.

**Материалы и методы исследований.** В основе расчётов лежит усовершенствованный алгоритм определения ключевых параметров теплового накопителя, который опирается на классические подходы к решению уравнений теплопередачи в цилиндрической системе координат. Данный метод учитывает основные механизмы обмена энергией: теплопроводность через графитовый материал и металлические элементы, лучистый перенос между внутренними поверхностями и эквивалентную теплопроводность, соответствующую процессам конвекции в заполненных газом межслойных пространствах. Для повышения точности результат уточняется итеративно с учётом переменных теплофизических свойств материалов по мере изменения температуры.

Дополнительно к теплотехнической части исследования в алгоритм был включён блок экономического анализа. Его назначение – рассчитать итоговую стоимость конструкции накопителя на этапе проектирования. Для этого учитывались объёмы основных компонентов (графитовый порошок, вольфрамовые экраны, базальтовая вата и аргон) и их стоимость, определённая на основании статистических данных из открытых источников. Каждый материал характеризуется собственной ценой, зависящей от требуемой массы или объёма.

В ходе проводимых расчётов изначально задавались граничные условия по рабочему температурному диапазону графитового наполнителя и предполагаемому режиму эксплуатации. Затем итеративно варьировалась толщина изоляционных слоёв и количество вольфрамовых экранов, чтобы найти оптимальное сочетание невысоких теплопотерь и приемлемых затрат на материалы. Поскольку целью являлось обеспечение

заданной тепловой ёмкости при минимальных совокупных расходах, на каждом шаге оценки принимались во внимание как изменения тепловых характеристик накопителя, так и влияние увеличения или уменьшения изоляции на совокупную стоимость системы.

В данной работе рассмотрен только накопитель типа «М». Указанная конфигурация была выбрана из ряда возможных вариантов промышленного масштаба в силу актуальности для агропромышленных процессов средней интенсивности. Расчётные данные по ценам материалов усреднялись с учётом рыночных предложений, что позволило приблизить результаты исследования к практическим условиям реального проектирования.

**Результаты исследований.** На основе проведённого анализа для накопителя энергии типа «М» выявлено, что наименьшая итоговая стоимость установки (около 9,9 тыс. руб.) достигается при высокой рабочей температуре равной 2000 °С и тепловых потерях  $Q = 5$  кВт. При попытках дополнительно снизить  $Q$  наблюдается рост совокупных затрат, обусловленный утолщением теплоизоляционного слоя и увеличением количества экранов из вольфрама.

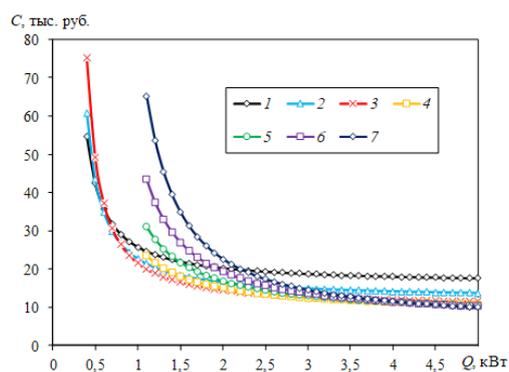


Рисунок 2 – Влияние теплотерь  $Q$  на совокупную стоимость теплового накопителя типа «М» при разных температурах графитового теплоаккумулирующего материала: 1 – 800; 2 – 1000; 3 – 1200; 4 – 1400; 5 – 1600; 6 – 1800; 7 – 2000

Структура расходов на материалы зависит от их термостойкости и физических свойств: чем выше температура на границе изоляции, тем более сложным и дорогим оказывается многослойный барьер.

Детальный перебор параметров продемонстрировал характерные зависимости совокупной стоимости  $C$  от величины теплопотерь при различных температурах графитового наполнителя. При  $Q$  в диапазоне от 3 до 4 кВт общие расходы уменьшаются от 14,44 до 11,26 тыс. руб. при температуре материала 1400-200 °С. Однако если рабочая температура ограничена уровнем 800-1400 °С, наименьшая стоимость в том же диапазоне теплопотерь оказывается выше в среднем на 21,6 %.

При более низких значениях  $Q$  (от 1,7 до 3 кВт) стоимость варьируется в пределах 17,39-12,39 тыс. руб., что соответствует температурным диапазонам 1000-1400 °С. Переход к температуре равной 800-1200 °С приводит к удорожанию установки в среднем на 17,2 %. Если же теплопотери удаётся уменьшить до 0,6–1,7 кВт, совокупные затраты составляют от 29,8 до 17,39 тыс. руб. при температуре около 1000-1200 °С, тогда как при 800 °С расходы ещё возрастут на 10,6 %. Наконец, при показателях  $Q \leq 0,5$  кВт наиболее рентабельным оказался вариант с температурой 800 °С, стоимость которого достигла 42,3 тыс. руб., что свидетельствует о существенном влиянии толщины изоляции и стабильности высокотемпературного режима на конечную цену.

**Выводы.** 1. Результаты расчётов указывают на наличие оптимального баланса между увеличением теплоизоляции для снижения потерь и ростом затрат на материалы. 2. При температуре графитового наполнителя свыше 1400 °С наблюдается заметное уменьшение совокупных издержек при умеренных теплопотерях, однако дальнейшее повышение до 2000 °С требует тонкой настройки конструкции. 3. С точки зрения применения в АПК накопитель типа «М» обеспечивает гибкий

выбор режима работы, позволяя учитывать сезонные колебания спроса на тепловую энергию и особенности технологических процессов в отрасли.

*Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан»*

#### **Библиографический список**

1. Оценка процесса переноса энергии в тепловом накопителе с высокотемпературным рабочим телом при его разрядке / А. Н. Чадаев, А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2024. – Т. 24, № 4. – С. 73-85.

#### **References**

1. Ocenka processa perenosa jenergii v teplovom nakopitele s vysokotemperaturnym rabochim telom pri ego razrjadke / A. N. Chadaev, A. V. Dmitriev, V. Je. Zinurov [i dr.] // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Jenergetika. – 2024. – T. 24, № 4. – S. 73-85.